

|            |  |
|------------|--|
| 氏名         | 加藤 貴彰  |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士（工学）   |
| 学位記号番号     | 博理工甲第 907 号  |
| 学位授与年月日    | 平成 25 年 3 月 22 日   |
| 学位授与の条件    | 学位規則第 4 条第 1 項該当   |
| 学位論文題目     | 静電浮上システムの制御に関する研究<br>(Study on Control of Electrostatic Suspension System) |
| 論文審査委員     | 委員長 教授 水野 毅<br>委員 教授 高崎 正也<br>委員 教授 綿貫 啓一<br>委員 准教授 長嶺 拓夫                  |

## 論文の内容の要旨

シリコンウェハやマザーガラスなどは生産効率向上を目的として大型化が進んできた。生産効率向上にはコンタミネーションの回避が重要であり、その方法の一つとして非接触搬送がある。コンタミネーションの回避以外にも、大型化したこれらの板状物体は、自重による撓みが製品へ悪影響を与えたり、品質検査上の問題であったりするため、撓みを抑制するように支持力の分布を工夫して浮上・搬送することが必要となる。

非接触浮上には、空気を利用する方法と磁気を利用する方法、静電気を利用する方法の他に光を利用する方法もある。空気を利用する方法にはエアフィルムやエアクッションと呼ばれるような噴流を利用するものと、ベルヌーイの定理を利用するもの、さらに超音波を利用するものがある。超音波を利用するものは近接場浮揚か定材波を利用する方法がある。利点は、多くの場合、受動的に垂直方向の浮上が安定することである。また、対象物は平面を持ち、空気を通さない物体に限られるがシリコンウェハなどの板状物体には適している。欠点は、超音波を利用する以外は水平方向に復元力が作用しないことと、真空中で利用できないことである。磁気を利用する方法は様々であるが、基本的には永久磁石か電磁石による吸引浮上か交流電流と渦電流を利用した反発浮上、超伝導体などを含む反磁性体の反発浮上である。利点は真空中でも利用可能であることと、磁気浮上鉄道のように大きな浮上力を発生できることである。欠点は静磁場だけの安定化が不可能であるため、アクティブ制御か、安定化するための電気回路が必要なことである。また反発浮上は材料が非常に限られること、吸引浮上も磁性体に限られることである。静電浮上は吸引力によって物体を浮上させる。磁気浮上と同様に安定化には制御が必要である。また磁気浮上に比べて浮上力が小さいため利用は主に MEMS のみであった。利点は浮上力が作用する材料が多様であることである。さらに真空中、超磁場中、磁気フリーな環境で利用可能なことである。このことが真空クリーンルームでのシリコンウェハやガラスなど板状物体の搬送に適しているため注目されている。

本研究では静電浮上に着目している。これまで、浮上対象の材料による違いや真空中などの浮上環境については研究が行われてきているため、本研究の目的は制御とする。詳しくは以下の三つである。

- I. 可変キャパシタを利用した静電浮上制御システムの開発
- II. セルフセンシング静電浮上システムの開発
- III. 多重式静電浮上システムの開発

これまでの研究と応用分野の動向から、問題になると予測される静電浮上システムの電圧制御とセンシング方法について新しい方法を提案し、理論的・実験的に検討を行う。

本論文は第1章から第7章で構成されている。各章の内容を以下に示す。

第1章は序論として、研究の背景となる近年の応用分野の動向と先行研究、関連研究について説明する。また本研究の目的についてより詳しく説明している。

第2章は静電浮上に関する基本的な理論として、静電気力の方程式や静電浮上システムの運動方程式を導出している。さらに状態空間モデルを示し、可制御性を調べた。静電浮上システムに関する理論として、空気中の静電浮上システムに作用する減衰についてスクイーズ膜理論から減衰係数を求めた。コンデンサの端効果について、端効果を考慮した近似式と考慮していない近似式を比較し、生じる誤差について明らかにした。静電気力の限界と絶縁破壊の関係について記述し、静電浮上で搬送できる対象の限界について述べた。

第3章は可変キャパシタを利用した静電浮上システムについて記述する。可変キャパシタに関して、種類を挙げて説明を述べ、本研究で利用した可変キャパシタのモデル化について運動方程式を導出した。可変キャパシタを利用した静電浮上システムの電圧制御について状態空間モデルを利用し、可制御性について調べた。実験装置の基本特性として、静電容量と周波数特性、減衰特性を調べた。最後に、可変キャパシタを利用した静電アクチュエータ制御システムを静電浮上システムの電圧制御に応用した結果を示す。

第4章では多重静電浮上システムについて記述する。多重静電浮上システムの概要を説明し、制御形と接続方法からシステムを分類し、基本構成を提案した。それぞれの可制御性について検討し、多重磁気浮上システムと比較して説明する。多重静電浮上システムの設計に関して、条件数を利用した設計指標を示す。また、提案した多重静電浮上システムのうち、電圧制御形並列接続型については実験によって実現可能であることを示した。

第5章は多重静電浮上システムのうち、電圧制御形並列接続型について、その電圧制御に可変キャパシタを利用することを提案し、可制御性に与える影響と、電圧制御システムの遅れが制御に与える影響について調べている。最後に実験によって実現可能であることを示した。

第6章は静電浮上システムにおける対象の位置センシング方法として、可変キャパシタを利用した電圧制御システムでの位置推定と、それを利用したセルフセンシング静電浮上システムについて記述する。位置を推定する方法として、方程式を利用することを提案し、静電浮上システムへの印加電圧と可変キャパシタの静電容量から浮上対象の位置を推定することができることを明らかにした。位置推定に必要な印加電圧の測定と静電容量の測定について基礎実験を行い、結果を示す。位置推定の静特性と動特性を示し、考察した。また、提案した手法によって推定した位置信号を利用したセルフセンシング静電浮上を行った結果を示した。

第7章は静電浮上システムの制御に関する提案と、それに関する実験結果をまとめ、結論を述べて本論文を結んでいる。

## 論文の審査結果の要旨

本論文の審査委員会は、2013年1月21日に論文発表会を開催した。その発表を含めて学位論文の審査を行った。研究の概要は以下のとおりである。

近年、シリコンウェハやマザーガラスなどは、生産効率向上を目的として大型化が進んでいる。生産効率向上にはコンタミネーションの回避が重要であり、その方法の一つとして非接触搬送がある。コンタミネーションの回避以外にも、大型化したこれらの板状物体は、自重による撓みが製品へ悪影響を与えたり、品質検査上の問題であったりするため、撓みを抑制するように支持力の分布を工夫して浮上・搬送することが必要となる。非接触浮上には、空気を利用する方法、磁気を利用する方法及び静電気を利用する方法がある。本研究では静電浮上を対象とし、その制御について論じている。具体的には、以下の3項目について研究を行っている。

- (1) 可変キャパシタを利用した静電浮上制御システムの開発
- (2) セルフセンシング静電浮上システムの開発
- (3) 多重式静電浮上システムの開発

これまでに行われた研究と応用分野の動向から、浮上対象の大型化に伴って問題になると予測される静電浮上システムの電圧制御とセンシング方法について新しい方法を提案し、必要となる電力増幅器の数を減らす方法について理論的・実験的に検討を行った。

本論文は、第1章から第7章で構成されている。各章の内容を以下に示す。

第1章では、研究の背景となる近年の応用分野の動向と先行研究、関連研究について説明しており、研究の目的について詳しく述べられている。

第2章では、静電浮上に関する基本的な理論として、静電気力の方程式や静電浮上システムの運動方程式を導出している。状態空間モデルを示し、可制御性について調べている。また、静電浮上システムのモデル化に関して、コンデンサの端効果を考慮した近似式と考慮していない近似式を比較し、生じる誤差を明らかにしている。さらに、空気中の浮上体に作用する減衰についてのスクイーズ膜理論を紹介している。また、静電気力の限界と絶縁破壊の関係について記述しており、静電浮上で搬送できる対象の限界について述べている。

第3章では、可変キャパシタを利用した静電浮上システムについて記述している。可変キャパシタに関して、例を挙げて説明し、本研究で利用した可変キャパシタについて運動方程式を導出している。可変キャパシタを利用した静電浮上システムの電圧制御について、状態空間モデルに基づいて、その可制御性について調べている。実験装置の基本特性として、静電容量と周波数特性、減衰特性を示している。最後に、可変キャパシタを利用した静電アクチュエータ制御システムを静電浮上システムの電圧制御に応用した結果が示されている。

第4章では、多重静電浮上システムについて記述している。多重静電浮上システムの概要を説明し、接続方法及び浮上用電極と直列に接続する外部抵抗の有無から、システムを分類している。つぎに、本章で取り扱うシステムのモデルが導出されている。そして、それぞれのシステムの可制御性が調べられている。また、多重磁気浮上システムとの比較がなされている。多重静電浮上システムの設計に関して、条件数を利用した設計指標が示されている。また、多重静電浮上システムの電圧制御形並列接続型については実験結果が示され、実現可能性を実証している。

第5章では、電圧制御形並列接続式多重静電浮上システムについて、その電圧制御に可変キャパシタを利用することが提案され、その可制御性及び電圧制御システムの遅れが制御に与える影響について調べている。さらに、実験装置において、実際に静電浮上を実現している。

第6章では、静電浮上システムにおける対象の位置センシング方法として、可変キャパシタを利用した電圧制御システムでの位置推定と、それを利用したセルフセンシング静電浮上システムについて記述している。位置を推定する方法として、センシング用の高周波交流信号を重畳することが提案され、静電浮上システムへの印加電圧と可変キャパシタの静電容量から浮上対象の位置を推定できることを明らかにしている。そして、位置推定に必要な印加電圧の測定と静電容量の測定についての基礎実験の結果を示している。また、位置推定の静特性と動特性を示し、誤差の要因などについて考察している。さらに、提案手法に基づいたセルフセンシング静電浮上を実現した結果を示している。

第7章では、静電浮上システムの制御に関する提案と、それに関する実験結果のまとめ、結論が述べられている。

以上のように、本論文は、静電浮上システムの制御に関して、可変キャパシタンスを利用した制御システム、あるいは複数の静電浮上システムを1台の電力増幅器によって制御する方法について研究し、理論的に実現可能である条件を示すと共に、実際の静電浮上の実現に成功している。また、位置推定の方法についても検討を行っており、静電浮上システムの制御に関する多くの知見と今後の可能性について示唆している。

なお、本論文の内容は、3章、4章、6章が Journal of System Design and Dynamics にそれぞれ掲載されている(いずれも第1著者)。5章の理論は Journal of Control, Measurement, and System Integration に掲載され(第2著者)、実験については Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetic and Mechanics に掲載されている(第1著者)。また、多くの国際学会で発表を行い、The 20th MAGDA Conference in Pacific Asia で優秀講演賞を受賞するなどしている。